

十三湖における流動及び土砂動態解析と ヤマトシジミの生息場評価に関する検討

NUMERICAL ANALYSIS OF WATER AND SEDIMENT DYNAMICS AND
EVALUATION OF THE HABITAT FOR *CORBICULA JAPONICA* IN LAKE JUSAN

望月貴文¹・天野邦彦²・岩見洋一¹

Takafumi MOCHIZUKI, Kunihiko AMANO and Yoichi IWAMI

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室
(〒305-0804 茨城県つくば市旭一丁目)

²正会員 工博 国土交通省 中部地方整備局 浜松河川国道事務所
(〒430-0811 静岡県浜松市中区名塚町266)

We have analyzed the dynamics of water, which is driven by sea water intrusion and wind, and the dynamics of sediment considering re-suspension of bottom sediments caused by wind waves in estuarine lake by a developed numerical model. Using this model, we have evaluated the potential habitat for *Corbicula Japonica* based on the following three points in Lake Jusan, such as 1) Retention time of salt water 2) Time-space variations of particle size distribution of bottom sediments and 3) movement of larvae of *Corbicula Japonica*.

Simulation results indicated that area of which bottom elevation is shallower than T.P.-1.5m is the potential habitat in terms of suitable salinity and grain size of bottom sediments. Dynamics of water affects the success of settlement of larvae onto suitable habitat. We have evaluated important habitat for *Corbicula Japonica* in Lake Jusan based on above three points.

Key Words : Lake Jusan, *Corbicula Japonica*, dynamics of water and sediment, habitat evaluation

1. はじめに

河川汽水域は大きな人為改変を受けることが多く、それは塩水流動や土砂・物質動態を変化させ生物の生息に大きな影響を与えている。しかし、河川汽水域は環境が複雑であり、河川汽水域の河道管理を適切に行っていく上で必要な生態工学的な観点からの知見は十分ではない。

シジミは我が国の汽水域漁業では非常に大きなウエイトを占めている¹⁾。なお、日本におけるシジミ漁業の99%以上はヤマトシジミ (*Corbicula Japonica*) のため、以降ヤマトシジミを対象に述べるものとする。ヤマトシジミの生態に関する研究は多く、例えば鶴田ら²⁾は小川原湖における産卵・発生時の塩分環境や浮遊幼生の拡散について検討を行っている。また、中村¹⁾によると、ヤマトシジミの生息に影響を及ぼす重要な環境要因として、底質粒度、溶存酸素量、塩分が挙げられている。

本稿において検討の対象とする十三湖は、日本を代表するヤマトシジミの産地となっている。十三湖における

溶存酸素量、塩分環境とヤマトシジミの生息の関係については梅田ら³⁾、Atasら⁴⁾により現地調査及びシミュレーションモデルによる検討が行われており、中層部の貧酸素化がシジミの生息に及ぼす影響や、稚貝個体数の年変動と水温・塩分との関係が深いことを示唆している。

十三湖におけるシルト・粘土の動態については、望月ら⁵⁾により、浮遊砂・濁度の観測による湖内での土砂捕捉システムや、底質の決定に関する分析がなされており、その中で流れや風波によるシルト・粘土の巻き上げが底質の決定に大きく影響していることを示唆している。

湖沼におけるシルト・粘土の巻き上げは盛んに研究がなされており、例えば天野ら⁶⁾⁷⁾は、浅い貯水池や湖沼における底泥の巻き上げ機構の定量的評価を行っている。

本研究では以上の研究成果を踏まえつつ、十三湖を対象に、海水の浸入の影響を適切に評価した流動解析及び底泥の巻き上げとそれに伴う底質の粒径分布の時空間変化を考慮した土砂動態解析を行った。その結果を用いて、①シジミ成貝の生息及び産卵に適した塩分が満たされる時間割合、②底質の粒度組成の変化、③シジミの浮遊幼

生の移動に着目し、十三湖のヤマトシジミの生息場ポテンシャルについて検討を行った。

2. 方法

(1) 十三湖の概要

十三湖は、岩木川の最下流部に位置する汽水湖であり、湖面積約18km²、水面標高0m、湖心部における最大水深約2mと浅く、岩木川の流域面積2,540km²と比べて湖の容積は約1,600万m³と小さいことから、平常時の河川流入水の湖滞留時間は約3日と短い³⁾ことが特徴である。日本海とは水戸口と称する幅約165m、水深約3.5m、延長約800mの水路で接続されている。

(2) 数値計算モデルの概要

汽水域における流動は、河川流、潮汐流、吹送流、塩分に基づく密度流により駆動される。本研究で使用した数値計算モデルは、渡辺ら⁸⁾により東京湾における流動解析に使用されている準3次元モデルを基本としている(Blumberg and Goodrich⁹⁾モデルにおいて採用されている連続式、運動量式、塩分収支式及び乱流計算モデルに水温モデルを加え、全体モデルを構築している。)。また、河川汽水域において任意の水域における塩分と懸濁物の「経過時間」と「残留時間」の分布についても計算できるモデルを使用した¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。

さらに、底泥からの巻き上げを水中に負荷される懸濁物濃度として解析する「土砂動態解析モデル」を設定した。土砂動態解析モデルの詳細については後述する。

a) 地形条件

設定した地形条件を図-1に示す。日本海からの海水流入を精度良く再現するために、計算領域は十三湖を含む岩木川河口部と水戸口を通じて繋がる日本海の一部とし、上端は繁田観測所(河口から約14km)、日本海は水戸口を中心に南北に約10km、東西に約5kmの海域とした。河道地形は平成14年度測量結果、湖底地形は平成18年度測量結果(いずれも国土交通省青森河川国道事務所提供)を使用した。海底地形は海上保安庁発行の海図(W1195:平成15年7月31日発行)をもとに作成した。

b) 格子条件

計算格子は、水平方向で水戸口より上流側(十三湖及び岩木川)を50m×50mで分割し、海側は水戸口に近い部分では50m×50m、水戸口から遠くなるにつれて徐々に大きくなり、最大で500m×500mとなる不等間隔格子とした。鉛直方向にはσ座標で5層とした。

c) 流量条件

岩木川の河川流量条件の設定では、上端の繁田観測所の実測データを基本とするが、下流の芦野頭首工での灌漑期の取水の影響に留意して行った。

また、十三湖には岩木川の他、山田川、鳥谷川、相内

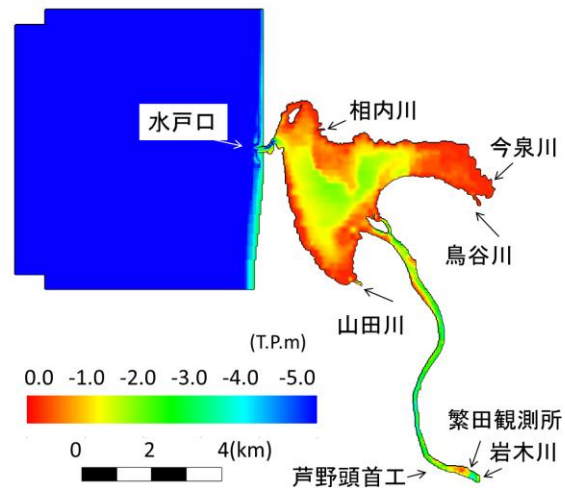


図-1 設定した地形条件

川、今泉川などの河川が流入している。主流は岩木川であり、全流域面積の80%を占めているが、残る流域面積20%分の淡水流入を考慮する必要がある。これらの河川からの流入量は流域面積比から岩木川流量の25%量を各河川に割り当てた。感度分析の結果より、山田川と鳥谷川に岩木川の8%、相内川と今泉川に岩木川の4.5%を適切な流量条件として仮定した。

d) 気象条件

流動計算時の駆動力、風波、水温変化などに関わる気象条件として風向、風速(十三観測所、国土交通省青森河川国道事務所)、気温、降水量(市浦観測所、アメダス)、全天日射量、雲量(青森地方气象台)、湿度(深浦特別地域気象観測所)のデータを用いた。

e) 水温、塩分条件

日本海側の水温、塩分の境界条件は、青森県水産総合研究センターが毎月実施している定線海洋観測結果より、十三沖側線13地点のデータを用いた。

流入河川の水温条件は、神田橋(河口から約14km)で毎月観測された5カ年(2005年6月～2010年5月)分の水温と気温の関係より回帰式を求めて設定した。なお、気温20℃を境界として水温-気温の関係が変わる傾向があったため、気温20℃を境に2つの回帰式を作成した。

f) 潮位条件

潮位は十三湖近傍で潮位観測結果が存在する深浦(水戸口より南へ約50km)のデータを用いた。

g) 検証計算

解析期間は2007年5月～2008年6月とし、計算結果と、表-2及び図-2に示す水位、塩分、濁度の実測データを用いて検証を行った。なお、計算助走期間を解析期間の前に1ヶ月間程度とっている。

(3) 土砂動態モデルの概要

水中での懸濁物濃度解析には、塩分濃度解析と基本的に同様の拡散方程式を用いるが、沈降と底泥からの巻き上げによる変化を考慮している点が異なっている。

沈降による変化の算定については、沈降速度を与えることで対応し、底泥からの巻き上げ量の算定は、既往のモデル⁷⁾により求めた値を与えることで対応した。ただし、計算では5種類の粒径別に懸濁物濃度を算定するため、粒径別の底泥巻き上げ量が必要になる。このため今回の計算では、水質計算格子の最底層の下に底泥層を一層設けて、水柱との懸濁物の収支計算を行うことで、5種類の粒径区分毎に懸濁物（底泥層においては底泥）の存在割合を逐次計算することとした。手順としては、上記巻き上げモデルにより水平計算格子毎に底泥巻き上げ総量をまず求め、対応する直下の底泥層における存在割合に応じて各粒径の底泥が巻き上がるものとした。水柱中の水質計算では、粒径毎に濃度変化を求めるとともに、底泥層への堆積フラックスを求めて底泥層に与えた。この底泥の巻き上げ負荷を受ける水中での懸濁物の移流拡散方程式と底泥モデルについて以下に示す。

a) 浮遊物質の移流拡散方程式

十三湖や岩木川の懸濁物は河川からの流入と、底泥の巻き上げ負荷による物として次式(1)(2)により解析することとした。懸濁物は粒径区分毎に解析している。

$$\frac{\partial SSiD}{\partial t} + \frac{\partial SSiuD}{\partial x} + \frac{\partial SSivD}{\partial y} + \frac{\partial SSi\omega}{\partial \sigma} \quad (1)$$

$$= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial SSi}{\partial \sigma} \right] + F_{ssi} - S_{vssi} \frac{d}{dz} SS_i + FLX_{res} \frac{d}{dz} Sr_i$$

ただし、

$$F_{ssi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D2A_H \frac{\partial SSi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[DA_H \frac{\partial SSi}{\partial y} \right] \quad (2)$$

ここでSSiは懸濁物濃度 (i=1~6; 粒径区分6種類)、Dは全水深 (H+η)、σはσ座標 (-1 ≤ σ ≤ 0)、tは時間、x,yは水平方向座標軸、u,v,ωは各軸方向の流速成分、A_Hは水平拡散係数、K_Hは鉛直方向の拡散係数、S_{vssi}は浮遊物質の沈降速度、FLX_{res}は後述する底泥からの巻き上げ量、Sr_iはi番目の粒径の存在率である。

b) 底泥モデル

底泥の巻き上げは風波や流れによるエネルギーが底面に達して生じるせん断応力が起因となって生じる。底泥モデルは、米国HydroQual Inc. のモデル (Sediment Transport Module)¹³⁾を参考にした。なお、底泥の巻き上げ率に関するパラメータは既報⁷⁾と同様とした。

c) 土砂動態に関する条件設定

巻き上げに寄与する底泥層厚や個々の粒径集団の存在割合の設定手法を以下に示す。まず、粒径区分及び河川流入水中の粒径集団別存在割合は、五所川原における浮遊砂観測⁹⁾の結果を用いて、表-3のように設定した。沈降速度はStokes式¹⁴⁾より算定した。なお、SS6は濁度の要因となる水中を漂うプランクトンや微細な懸濁物を表現するための集団であり、沈降速度をもたないと仮定し設定した。そのため、水中のみに存在し、底層への堆積物には含まれない。また、巻き上げに寄与する初期の底泥の粒径分布は十三湖内のセディメントトラップ調査

表-2 検証に用いたデータ

項目	使用データ	地点(図-2)	期間
水位	十三水位観測所	十三	全期間
塩分	梅田ら ³⁾ による観測結果	A~D	07.6.9~07.10.11
濁度	望月ら ⁵⁾ による観測結果	十三湖大橋	07.6.1~08.2.28

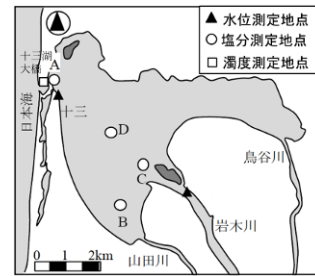


図-2 検証に用いたデータの観測地点

表-3 設定した粒径区分

設定名	中央粒径(粒径帯)	沈降速度	流入水の割合
SS1	2.25μm(1~3.5μm)	0.39m/day	14%
SS2	5.25μm(3.5~7.0μm)	2.14m/day	20%
SS3	9.75μm(7.0~12.5μm)	7.38m/day	20%
SS4	18.75μm(12.5~25μm)	27.31m/day	20%
SS5	50.00μm(25~75μm)	187.81m/day	20%
SS6	1μm(~1μm)	0.00m/day	6%

(国土技術政策総合研究所)の結果を参考に、全域一様でSS1~SS5が20%ずつと設定した。底泥の粒径分布は、計算の進行とともに巻き上げ沈降を繰り返して変化し、全層で時々刻々混合するものとする。計算初期の層厚(土砂量)は、初期層厚を変更したいいくつかのケースにおいて感度分析を行うことで最適な層厚を設定した。

(4) シジミの生息場ポテンシャルに関する検討

以上の解析結果より、①シジミ成員の生息及び産卵に適した塩分が満たされる時間割合、②底質の粒度組成の変化、③シジミの浮遊幼生の移動の3つに着目し、生息密度の実測値を比較することでシジミの生息場ポテンシャルについて検討した。検討方法を以下に示す。

a) シジミ成員の生息及び産卵に適した塩分が満たされる時間割合

ヤマトシジミは高塩分と低塩分の両方の影響を受ける。既報¹⁵⁾によれば、塩分21psu以上に6時間以上曝されるとシジミは生息できないとされている。また、Atasら⁴⁾はふ化から幼生になるためには夏季の産卵期に3.1psu以上の塩分が必要とされており、これを年間産卵可能日数としている。塩分の時空間変化の計算結果を用いて、上記の条件に該当する時間割合を集計した。

b) 底質の粒度組成の変化

中村¹⁾によると、ヤマトシジミはシルト・粘土含有率50%が生息限界値、10%以下が好適とされていることから、シルト・粘土の堆積のしやすさは重要な検討項目になりうる。このことから、粒径集団別の土砂の堆積状況に着

目し、巻き上げ沈降に影響を及ぼすせん断応力の分布を風波、流れの2種類について求めた。また、粒径集団別の堆積量を集計し、その空間分布を把握した。

c) シジミの浮遊幼生の移動

シジミの浮遊幼生の追跡計算については、鶴田ら²⁾、天野ら¹²⁾と同様、浮遊幼生を中立浮遊物質として移流拡散解析を行う手法を取った。十三湖ではシジミの産卵期に合わせて7月10日～8月20日までを休漁日としていることから、この期間かつ浮遊期間（約1週間）に出水の影響を受けない日を発生日（7月16日、7月31日、8月16日の3日間）とした。なお、シジミの浮遊幼生の発生量は、十三湖におけるシジミの生息密度調査結果¹⁶⁾の2007年の成果を用いて、**図-3(左)**に示すように、最も生息密度の高いエリアを100%とし、その他は相対的な密度の大小に応じて発生割合を設定した。発生割合が100%のエリアでは仮の値として1日あたり1,000g/m²発生するように設定した。そして、それが着底までどこにどれだけ留まるかという相対的な残存率を把握することとした。また、**図-3(右)**に示すように類似の生息密度によりエリアを5つに分けた。十三湖ではエリア2, 3, 4で生息密度が高く、発生率も高く設定した。浮遊幼生の追跡計算の結果は、それぞれのエリアで発生した浮遊幼生が7日後に残存する割合をエリア毎に集計することで整理した。

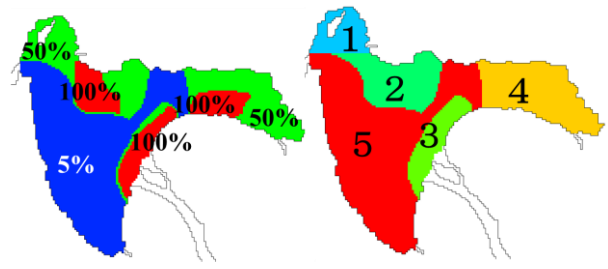


図-3(左) シジミの浮遊幼生の発生割合分布 (右) シジミの生息密度によるエリア区分 (浮遊幼生の追跡計算の集計エリア)

3. 結果

(1) 検証計算結果

a) 水位

水位の実測結果と計算結果の比較を**図-4**に示す。解析結果が実測と良い対応を示すことが確認できた。

b) 塩分

観測期間中の五所川原流量及び塩分の実測結果と計算結果の比較を**図-5**に示す。観測期間中の特徴的な現象として、7月中旬から8月の初めまで渇水状態であったが、その直後約200m³/sの出水が見られた。さらに9月中旬にはピーク時で約820 m³/sの出水が生じており、全測点で塩分0.0psuとなり淡水流入の影響が現れている。計算では出水期間を除いて全体的に下層の塩分が上層より数psu～10psuほど高くなっていた。概ね観測結果と同程度の濃度レベルで推移しているが、以下の2点について実測値と違いが見られた。1点目は、地点D下層以外で実測値では7月中旬から8月上旬にかけて塩分上端値が徐々に低下する特異な変動が見られたが、計算結果ではこの低下は再現されなかった。この塩分変動の要因として、梅田ら³⁾は汚損によるセンサ感度低下の可能性を述べている。2点目は、地点D下層において、6月、8月で計算値が実測値より低くなっている。原因は不明であるが、地点D下層の実測値ではその期間に他の地点で見られたような、日々の潮汐による大きな塩分の振幅が比較的少ない

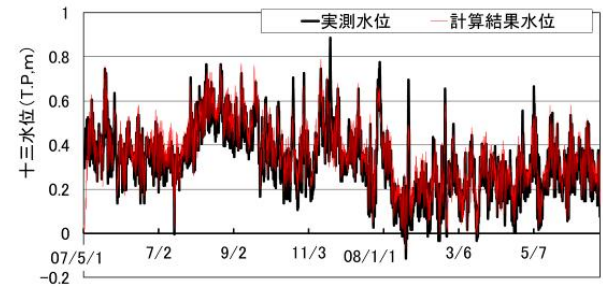


図-4 水位の実測値と計算結果の比較

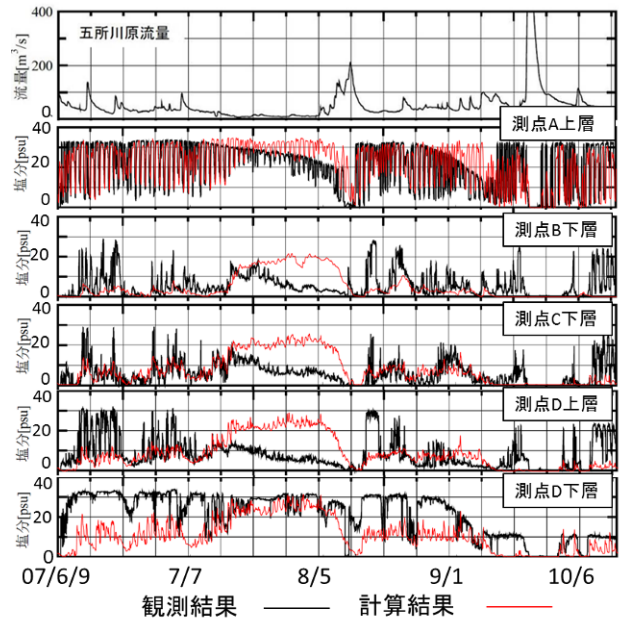


図-5 五所川原流量及び塩分の観測結果と計算結果の比較

ことから、観測地点が周辺と比べて窪地になっており、塩水が留まりやすくなっていた可能性が考えられる。

c) 濁度

計算開始初期の土砂量を変えて、計算値と濁度の実測値を比較することで感度分析を行った。その結果より、水中の懸濁物との交換可能な土砂量として、各粒径集団ともに4,000g/m² (層厚約15cm) を設定した。この設定による解析結果と実測値との比較を**図-6**に示す。計算初期は計算結果の方が高い位置で変動したものの、次第に計算結果は落ち着き、同程度の値で変化する結果が得られた。しかし、実測値で見られるようなスパイク状の濃度上昇の完全な再現までには至っていない。このスパイク状の濃度上昇は、水戸口の流速が大きいためにSS5よ

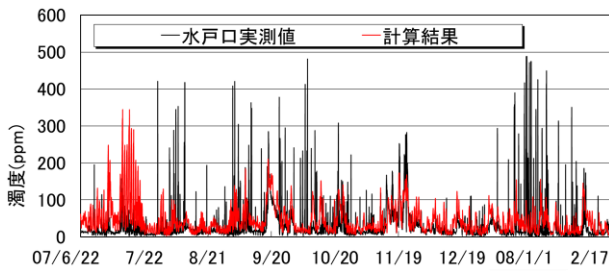


図-6 濁度の実測値と計算結果の比較

りも大きい粒径の土砂が一時的に巻き上がることが要因であると考えられる。ただし、これらの土砂は沈降速度が大きいことからその近くで沈降し、本稿で検討を行っている十三湖内の土砂堆積には影響しないと考えられる。

4. シジミの生息場ポテンシャルに関する検討

(1) シジミ成員の生息及び産卵に適した塩分が満たされる時間割合

高塩分に関する条件として底層塩分21psu以上となる時間の割合分布を図-7(左)に示す。ここでは、一回の潮汐を12時間と仮定して、21psu以上の塩分に6時間曝される場合を継続時間割合では50%と考え、その割合により生息場ポテンシャルが評価できるとした。岩木川と水戸口を結ぶ滞筋沿いに水戸口から十三湖中央付近までが高濃度に曝される時間が長く、特に水戸口周辺では50%以上でありシジミの生息に適さないことが示唆された。

また、低塩分に関する条件として夏季に3.1psu以上になる時間の割合分布を図-7(右)に示す。十三湖内のほぼ全域で夏季の塩分濃度3.1psu以上の日数割合8割以上となっており、産卵の条件を満たしていることが示された。

(2) 底質の粒度組成の変化

a) せん断応力分布

計算期間中のせん断応力の期間平均について、風波起源、流速起源、その2つを合成したものを図-8に示す。風波によるせん断応力は湖内でも比較的水深の浅い水域(図中○部)で大きくなる傾向にあり、流速によるせん断応力は水戸口と岩木川を繋ぐ滞筋で比較的大きかった。流れよりも風波に起因したせん断応力が大きく、水深の浅い水域で影響を受けやすくなることが予測された。

b) 粒径集団別の堆積状況

計算期間1年間の堆積量(正味の変化量)に占める各粒径集団の存在割合を図-9に示す。SS1は湖内ではほとんど堆積することなく流出している。SS2はエリア4及びエリア5のT.P.-1.5m以下の深いところに比較的多く20%程度を占める。SS3はエリア2, 3を除く全域で30%程度、SS4はエリア5の中でもT.P.-2.0m以下の特に深いところで多く40%以上を占める。SS5は湖内全域のT.P.-1.5m以

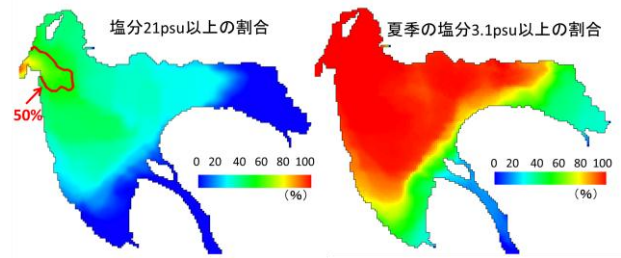


図-7 底層塩分濃度の時間割合分布

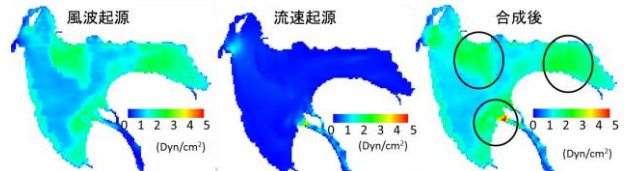


図-8 せん断応力分布

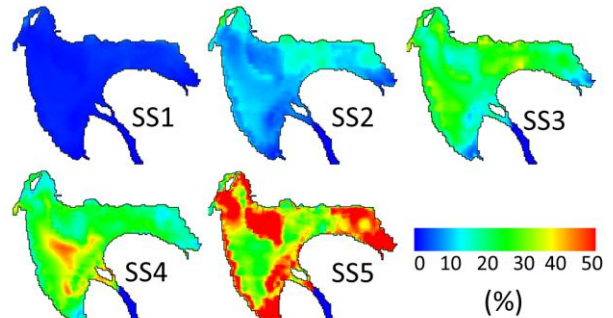


図-9 堆積量に占める各粒径集団の存在割合分布

上の浅いところで多く50%以上を占めている。

(3) シジミの浮遊幼生の移動

各エリアで発生した浮遊幼生の7日後の分布を図-10に示す。なお、8月17日発生分は8月4日とほぼ同様の結果であった。湧水で最も流量が少ない7月19日はエリア2, 3, 4で発生した浮遊幼生は7日後に広範囲に広がっていた。流量が増えてきた8月4日は、エリア2, 3発生分はほぼ流出してしまっていたが、エリア4で発生した浮遊幼生は7日後にもエリア4に留まる割合が多い。

5. 考察

以上の結果から、3つの観点の生息場ポテンシャルと生息密度の関係について考察する。シジミ成員の生息及び産卵に適した塩分が満たされる時間割合に関しては、エリア2, 3, 4はいずれも高塩分・低塩分条件ともに好適な範囲に入っていた。シルト・粘土の堆積に関しては、エリア2, 3は水深が浅く、水戸口と岩木川を結ぶ滞筋でもあるため、微細粒シルト(SS3)以下の細粒土砂が堆積しにくいことが分かった。エリア4はエリア2, 3に比較して微細粒シルト(SS3)以下の堆積は多いものの、水深が浅いことと吹送距離が長くなることから巻き上げが発生しやすく、年間を通して底質が泥質化することが起こり

にくくなっていると考えられる。塩分とシルト・粘土の堆積状況は、T.P. -1.5mを境界にして状態が変化している傾向があり、それより深いところでは2つの条件はともに悪くなる。この標高を上回るかどうかは、十三湖の環境を考えるうえで重要なポイントであることが示唆された。シジミの浮遊幼生の移動に関しては、エリア2, 3から発生した浮遊幼生は湧水時以外は着底まで湖内に留まりにくい、エリア4から発生した浮遊幼生は、湧水時以外もその多くが着底まで湖内に留まっていた。このことから、エリア4において安定したシジミの生息が可能ならば、その後も安定した供給が見込まれる。エリア4は十三湖のシジミの生息を考えるうえでは重要なエリアであることが本モデルを用いた解析により明らかとなった。エリア5の南端の山田川流入部付近は、塩分やシルト・粘土の堆積に関するシジミの生息場ポテンシャルはエリア2, 3と同様高く、また、浮遊幼生に着目すると湧水時であればエリア3, 5で発生した分が留まりやすく、着底率の高いエリアであると考えられる。この付近は2008年以降は比較的生育密度が高く、エリア2, 3, 4と同様重要なエリアであると考えられる。

6. まとめ

流動解析及び底泥の巻き上げ及びそれに伴う底質の粒径分布の時空間変化を考慮した土砂動態解析を行い、シジミの生息場ポテンシャルについて検討を行った。その結果、シジミの成員の生息場として適切な条件（適度な塩分が満たされる時間割合、底質の粒度組成）が継続的に満たされている場所はどこなのか、また、幼生の発生後、着底まで生存する確率が高い場所はどこなのかを評価したところ、実際の生育密度との対応が見られ、生息場に関する条件が推定できた。シジミの生息場評価に向けては年間を通じた適切な環境の継続時間を踏まえた評価を行うことが重要であり、汽水域の特徴を表現でき時々刻々と変わる環境状況を再現可能な本モデルは、河川事業等による河川汽水域の生物を含む環境影響を適切に評価する有効な手法になると考えられる。今後は砂以上の粒径も含めた土砂動態の再現性向上や、生態系反応も含めた検討を行えるよう改善して行きたい。

参考文献

- 1) 中村幹雄（編著）：日本のシジミ漁業-その現状と問題点、たたら書房、2000。
- 2) 鶴田泰士、石川忠晴、西田修三、成田舞、藤原広和：小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について、土木学会論文集, No.705, II-59, pp.175-187, 2002。
- 3) 梅田信、田中仁、小西絵里子、佐々木幹夫：十三湖における塩分と溶存酸素の変動に関する観測と解析：海岸工学論文集, 第55巻, pp.1051-1055, 2008。

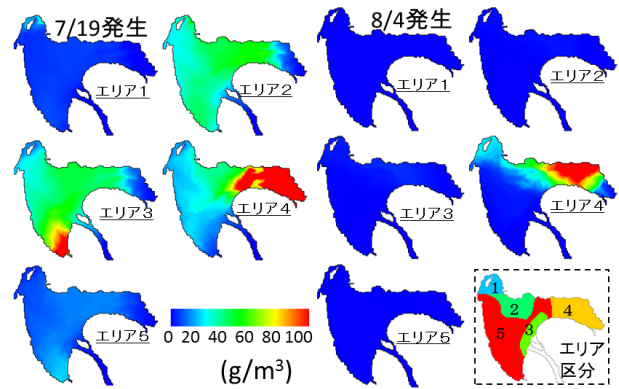


図-10 各エリアで発生したシジミの浮遊幼生の7日後の分布

- 4) Atas Pracoyo, 梅田信, 田中仁, 佐々木幹夫, 長崎勝康：十三湖におけるヤマトシジミ産卵期の塩分・水温と稚貝生息数に関する検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), v.67, n.2, pp. I_1001-1005, 2011。
- 5) 望月貴文, 天野邦彦, 藤田光一：十三湖におけるシルト・粘土の捕捉に着目した土砂動態の実態把握：水工学論文集, 第55巻, pp.1513-1518, 2011。
- 6) 天野邦彦, 安田佳哉, 鈴木宏幸：浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング, 水工学論文集, 第46巻, pp.1085-1090, 2002。
- 7) 天野邦彦, 時岡利和：印旛沼における底泥巻き上げ、湖底の光環境と水生植物との相互関係, 水工学論文集, 第50巻, pp.1321-1326, 2006。
- 8) 渡辺正孝, 天野邦彦, 石川裕二, 木幡邦男：秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と底層の無酸素水塊の湧昇過程, 土木学会論文集第7部門, n.608, VII-9, pp.13-29, 1998。
- 9) Blumberg, A.F. and Goodrich, D.M.: Modeling of wind-induced destratification in Chesapeake Bay, Estuaries, 13, pp.236-249, 1990。
- 10) 天野邦彦, 遠藤希実, 大沼克弘：河口汽水域における塩水滞留時間の算定手法開発：河川技術論文集, 第16巻, pp.283-288, 2010。
- 11) 天野邦彦, 大沼克弘, 遠藤希実：河川汽水域への海水浸入後経過時間および海水残留時間の数値解析による評価, 土木学会論文集G (環境), v.67, n.7, pp. III_367-374, 2011。
- 12) 天野邦彦, 遠藤希実, 大沼克弘：ヤマトシジミの生息域として見た菊地川河口域の環境変遷と修復の可能性評価：土木学会論文集B1 (水工学), v.68, n.4, pp. I_1561-1566, 2012。
- 13) HydroQual Inc.: A primer for ECOMSED version 1.3; user manual, HydroQual Inc., New Jersey, 2002。
- 14) 水理公式集, 土木学会, pp.387, 1999。
- 15) 西篠八束・奥田節夫：河川感潮域-その自然と変貌-, 名古屋大学出版社, 2000。
- 16) 青森県水産総合研究センター内水面研究所：ヤマトシジミ現存量調査報告書 (小川原湖・十三湖・高瀬川), 2011。

(2012. 9. 30受付)